

DERWENT-ACC-NO: 1990-164913  
DERWENT-WEEK: 199022  
COPYRIGHT 1999 DERWENT INFORMATION LTD

TITLE: Magnetic bearing operation with controller and  
power amplifiers -  
involves use of electromagnet current positive and negative  
directional  
measurements in position assessment of levitated object

INVENTOR: TRAXLER, A; VISCHLER, D ; VLEULER, H

PATENT-ASSIGNEE: MECOS TRAXLER AG[MECON]

PRIORITY-DATA: 1988CH-0004323 (November 22, 1988)

PATENT-FAMILY:

PUB-NO	PUB-DATE	LANGUAGE
PAGES	MAIN-IPC	
DE 3937687 A	May 23, 1990	N/A
000	N/A	
CH 678090 A	July 31, 1991	N/A
000	N/A	

APPLICATION-DATA:

PUB-NO	APPL-DESCRIPTOR	APPL-NO
APPL-DATE		
DE 3937687A	N/A	1989DE-3937687,
November 13, 1989		

INT-CL (IPC): F16C032/04; F16C039/06 ; G05D003/12 ;  
H02K007/09

ABSTRACTED-PUB-NO: DE 3937687A

BASIC-ABSTRACT: Two electromagnets (1,1') are energised  
from separate power  
amplifiers (3,3') to exert a lifting force on the rotor (4)  
of a rotating  
machine positioned between them. The control (5) operates  
on signals (yip,yin)  
from current transformers (2,2') in the power lines from  
the amplifiers (3,3'):  
to the respective electromagnets (1,1').

The state of movement of the rotor (4) is worked out for

the purpose of  
stabilising its contactless floating position by reaction  
on the amplifier  
inputs. This method renders movement sensors, as such,  
superfluous and  
eliminates errors by using data obtd. from the bearing  
itself and not from  
sensors making measurements at another location.

ADVANTAGE - More compact and less costly structure enables  
air gap data to be  
used instead of movement measurements by sensors sepd. from  
bearing.

CHOSEN-DRAWING: Dwg.2/6

TITLE-TERMS:

MAGNETIC BEARING OPERATE CONTROL POWER AMPLIFY  
ELECTROMAGNET CURRENT POSITIVE  
NEGATIVE DIRECTION MEASURE POSITION ASSESS LEVITATION  
OBJECT

DERWENT-CLASS: Q62 T06 V06 X11

EPI-CODES: T06-B02; V06-M10; X11-J05X;

SECONDARY-ACC-NO:

Non-CPI Secondary Accession Numbers: N1990-128050

①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑪ DE 3937687 A1

⑳ Aktenzeichen: P 39 37 687.7  
㉔ Anmeldetag: 13. 11. 89  
㉕ Offenlegungstag: 23. 5. 90

⑤1 Int. Cl. 5:  
**F16C 32/04**  
H 02 K 7/09  
G 05 D 3/12

DE 3937687 A1

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1  
22.11.88 CH 04323/88

⑦1 Anmelder:  
Mecos Traxler AG, Winterthur, CH

⑦4 Vertreter:  
Becker, M., Dipl.-Phys., Pat.-Anw., 7000 Stuttgart

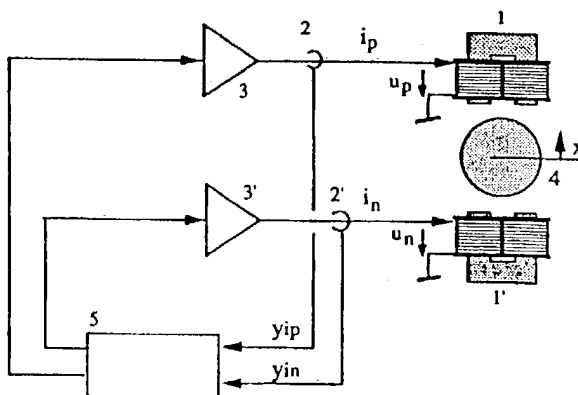
⑦2 Erfinder:

Traxler, Alfons, Dr., Winterthur, CH; Vischer, Dieter,  
Dr., Zürich, CH; Bleuler, Hannes, Dr., Zollikon, CH

⑤4 Magnetlager

Das Magnetlager weist Elektromagnete (1 und 1'), elektrische Verstärker (3 und 3') zur Ansteuerung der Elektromagnete, ein zu tragendes Objekt (4) und einen Regler (5) auf. Dieser Regler dient zur Auswertung der im Magnetlagerstrom  $y_p$  steckenden Information über den Bewegungszustand des zu tragenden Objektes und dadurch zur Stabilisierung der berührungsfreien Schwebe-Position. Durch dieses Verfahren sind Weg-Sensoren überflüssig, das System kann dadurch sehr kompakt gebaut werden, was insbesondere bei der Rotorlagerung große Vorteile bringt. Das Verhalten des zu tragenden Objektes wird im Magnetlager selbst erfaßt und nicht, wie bei Sensoren, an einer anderen Stelle (Fig. 2).

Fig. 2



DE 3937687 A1

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Betrieb einer elektromagnetischen Einrichtung zum berührungsfreien Tragen von Objekten und auf eine nach einem solchen Verfahren arbeitende Einrichtung, gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 bzw. 4.

Bei der elektromagnetischen Lagerung von Maschinenteilen wird die Lage des zu lagernden Objektes mittels berührungsfreier Wegsensoren erfaßt; in manchen Fällen werden auch die Geschwindigkeiten gemessen. Die Signale (Zustandsgrößen) werden einem Regler zugeführt, der mit Hilfe von Leistungsverstärkern die Ströme und Spannungen in den Elektromagneten so steuert, daß das zu lagernde Objekt stabil schwebt. Am häufigsten wird diese Technik für die berührungsfreie Lagerung von Rotoren und für Magnetschwebbahnen eingesetzt. Die Kosten für die Sensoren für die Zustandsgrößen machen einen beträchtlichen Teil der Kosten für eine Magnetlagerung aus. Sie brauchen Platz neben den Elektromagneten. Speziell bei Rotorlagerungen wird dadurch die Baulänge des Rotors vergrößert, was sich wiederum ungünstig auf die dynamischen Eigenschaften auswirkt. Außerdem erfassen die Sensoren die Zustandsgrößen nicht dort wo die Kräfte der Lagermagnete angreifen, was bei der Lagerung elastischer Rotoren zu Schwierigkeiten bei der Regelung führen kann.

Die Aufgabe der Erfindung ist es, ein Magnetlager zu schaffen, das sich in einer kompakteren und weniger aufwendigen Bauweise realisieren läßt.

Diese Aufgabe wird gemäß der Erfindung durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 1 angegebenen Maßnahmen gelöst. Diese erlauben, daß die Information, die in den elektrischen Größen Spannung  $u$  und Strom  $i$  der Lagermagnet-Wicklungen enthalten ist, ausgewertet werden.

Im folgenden wird die Erfindung anhand der Fig. 1—6 näher erläutert. Die sechs Figuren zeigen verschiedene erfindungsgemäße Ausführungen der Magnetlager.

Die Ausführung in Fig. 1 weist folgende Elemente auf: Ein Elektromagnet 1 mit Wicklung (Auslegung in Diss. ETH Nr. 7851, Traxler 1985, beschrieben) trägt mit seinem Magnetfeld berührungsfrei ein Objekt 4. Ein Verstärker 3 liefert eine elektrische Spannung  $u$ . Durch die Wicklung fließt ein Strom  $i$ . Der Strom  $i$  wird nach einem üblichen Verfahren, beispielsweise einem Shunt 2, gemessen. Das dadurch gewonnene Strom-Signal  $y_i$  enthält gemäß den weiter unten angegebenen Formeln Information über die Lage  $x$  des Objektes 4.

Damit wird es möglich, diese Information in einem Regler 5 so zu verarbeiten, daß durch geeignete Ansteuerung des Verstärkers 3 eine stabile Schwebelage des Objektes 4 erreicht wird, ohne die sonst üblichen Positionssensoren.

Die Ausführung in Fig. 2 weist entgegengesetzt wirkende Elektromagnete 1 und 1' auf. Dies erlaubt auf das Objekt 4 in positiver und negativer  $x$ -Richtung auszuüben. Die Komponenten 1, 2 und 3 für die positive Kraft-Richtung werden sinngemäß durch die Komponenten 1', 2' und 3' für die negative Kraft-Richtung ergänzt. Sie haben die gleiche Funktion wie in Fig. 1. Dabei genügt auch nur eine der zwei Meßeinrichtungen 2 und 2'.

In Fig. 3 ist gezeigt, wie mit einer zusätzlichen Flußdichte-Messung, beispielsweise durch eine Hallsonde 6,

eine weitere Eingangsgröße  $y_B$  für den Regler 5 gewonnen werden kann. In gewissen Fällen kann so eine Verbesserung des Regelverhaltens und/oder eine Vereinfachung des Regelalgorithmus erreicht werden. Fig. 4 zeigt die entsprechende Ausführung für zwei entgegengesetzt wirkende Magnete, wobei je nur eine der Meßeinrichtungen 6 und 6' bzw. 2 und 2' auch schon genügt.

In der Ausgestaltung nach Fig. 5 kann gemäß einer weiter unten angegebenen einfachen Formel (c) im arithmetischen Signalvorbehandlungselement 7 die Lage  $x$  des Objektes aus Strom-Signal  $y_i$  und B-Feld-Signal  $y_B$  ermittelt werden. Dadurch kann ein konventioneller Magnetlager-Regler für einen Steuerstrom Sollwert  $y_{ic}$  und ein Stromverstärker 9 verwendet werden, wie er etwa in der Diss. ETH Nr. 7573 (Bleuler, 1984) angegeben ist. Fig. 6 zeigt die entsprechende Ausführung mit zwei Magneten (1 bzw. 1'). In den Summatoren 8 bzw. 8' wird ein konstantes Vormagnetisierungsstromsignal  $y_{io}$  zum Steuerstromsignal  $y_{ic}$  bzw.  $-y_{ic}$  addiert. So wird eine in beiden Magneten entgegengesetzt gerichtete Vormagnetisierungskraft erzeugt.

Alle oben beschriebenen Ausführungen kommen also ohne Wegsensoren aus. Diese werden auch nicht etwa, wie in der Offenlegungsschrift DE 25 37 597 beschrieben, durch eine aufmodulierte hochfrequente Komponente in den Lagerwicklungen oder Zusatzwicklungen ersetzt, wo also Sensor- und Aktuator streng getrennt werden müßten. Vielmehr wird das Magnetlager als Elektromechanischen Wandler betrachtet, der in beide Richtungen (elektrisch-mechanisch und umgekehrt) gleichwertig arbeitet.

Als zusätzliche Information kann die magnetische Flußdichte im Magnetlager gemessen werden, was einfach und billig zu realisieren ist. Im Prinzip ist aber diese Zusatzmessung nicht notwendige Voraussetzung für das Funktionieren dieses Verfahrens, sie bringt aber in gewissen Fällen eine Verbesserung des Regelverhaltens.

Aus der Offenlegungsschrift DE 33 23 244 A1 ist eine elektromagnetische Lagerungseinrichtung bekannt, bei der die für die Lagerregelung notwendigen Bewegungsgrößen aus den Meßgrößen Spulenstrom des Tragma-gneten, Flußdichte sowie weiteren magnetischen und elektrischen Meßgrößen ermittelt werden. Die wichtigsten Vorteile des hier beschriebenen Verfahrens gegenüber der in DE 3 32 344 angegebenen Lösung sind:

1. Das neue Verfahren kommt auch ganz ohne B-Feldmessung aus.
2. Auch wenn B-Feldmessung verwendet wird müssen die in DE 3 32 344 erwähnten 4 Zustandsgrößen (Luftspalt und seine drei Ableitungen sowie Absolut-Beschleunigung des bewegten Teiles) hier nicht bestimmt werden. Sie können, falls gewünscht, mit oder ohne B-Feld-Messung rekonstruiert werden.
3. Für die Berechnung von Weg aus Strom und B-Feld wird eine sehr einfache algebraische Formel angegeben. Eine auf diesem Prinzip aufgebaute Regelung zeichnet sich durch ein sehr gutes Regelverhalten aus.

Das erfindungsgemäße Verfahren beruht also auf einer Reglerauslegung, die die Beobachtbarkeit der Regelstrecke "Magnetlager und bewegtes Objekt" mit Spannung als Eingang und Strom als Ausgang benutzt. "Beobachtbarkeit" ist im bekannten regelungstechnischen Sinne zu verstehen. Das bedeutet im konkreten

Fall, daß alle Zustandsgrößen des Systems, also auch Position und Geschwindigkeit des bewegten Teiles im Regler ermittelt werden können.

Das Verfahren hat den zusätzlichen Vorteil, Information über den Luftspalt am Ort des Lagermagneten zu verwenden, im Gegensatz zu Wegsensoren, die vom Lager getrennt sind und daher an einem anderen Ort als im Lager selbst messen.

Die Grundgleichungen für ein Magnetlager sind bekannt und in der Diss ETH Nr. 8665 von D. Fischer zusammengefaßt. Diese Dissertation wird nach dem Anmeldetag der vorliegenden Erfindung publiziert werden. Ihr Inhalt soll hier als inbegriffen gelten. Für die Grundgleichungen, siehe auch beispielsweise die zwei anderen oben angegebenen Dissertationen und die dort angeführten Literaturstellen. Unter Vernachlässigung von Verlusten wie Streuung, elektrischen Widerstand und Magnetisierungsenergie des Eisens lauten sie:

$$k_{ij} = F - k_s x, m\ddot{x} = F, F = k_B B, F = k_u \int u dt$$

wobei

$i$  = Strom,  $x$  = Weg,  $F$  = Kraft,  $B$  = Magn. Flußdichte,  $u$  = Spannung,  $k_i$ ,  $k_s$ ,  $k_B$ ,  $k_u$  = Konstanten im Arbeitspunkt

Die Regelstrecke "Magnetlager-bewegter Teil" mit der Spannung  $u$  als Eingang und dem Lagermagnet-Wicklungsstrom  $i$  als Ausgang führt gemäß obigen Grundgleichungen und nach Normierung der Konstanten auf folgende Übertragungsfunktion (mit der Frequenzbereich-Variabel  $s$ ):

$$y_i = \frac{s^2 - 1}{s^3} u \quad (a)$$

Durch die Erfindung wurde die Erkenntnis gewonnen, daß der einfachste Regler für diese Magnetlager-Regelstrecke durch Methoden der Regeltheorie angegeben werden kann als:

$$\frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_1 s + a_0} \quad (b)$$

In der oben erwähnten Diss. ETH Nr. 8665 von D. Fischer sind die konstanten Koeffizienten  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $a_0$ , und  $a_1$  für ein numerisches Beispiel derart ausgerechnet, daß ein solcher Regler (b) die gegebene Regelstrecke (a) stabilisiert. Dies stellt somit die einfachste Form des sensorlosen Magnetlagers mit Regler dar. In weiterer Ausgestaltung der Erfindung kann dieses Verfahren auch für Zustandsregler mit vollständigem oder reduziertem Beobachter verwendet oder auf Mehrgrößen-Systeme erweitert werden.

In noch weiterer Ausgestaltung der Erfindung kann das Verfahren auch durch die Messung der Induktion (Flußdichte)  $B$ , beispielsweise durch Hallsonden, im Lagermagnet, ergänzt werden (Fig. 3 und 4) um eine Vereinfachung des Reglers oder eine Verbesserung des Regelverhaltens zu erreichen.

In noch weiterer Ausgestaltung der Erfindung kann eine einfache Formel für die Ermittlung des Wegsignals  $x$  aus dem gemessenen  $B$ -Feld ( $y_B$ ) und dem gemessenen Wicklungsstrom ( $y_i$ ) kann gemäß der Erfindung wie folgt angegeben werden:

$$x = k_1 y_B - k_2 y_i \quad (c)$$

wobei die Konstante  $k_1$  die Empfindlichkeit der Flußdichtemessung und die Konstante  $k_2$  die Geometrie der Magnete enthält.

Für zwei einander gegenüberliegende Magnetpaare, die mit Strömen  $i_p$  und  $i_n$  von der Form

$$i_p = i_0 + i_c \text{ und } i_n = i_0 - i_c \quad (d)$$

angesteuert werden, wobei  $i_0$  der Ruhestrom oder Vormagnetisierungsstrom durch die beiden Magnete ist und  $i_c$  als Steuerstrom dient, und in den einander gegenüberliegenden Magnetpaaren je die Flußdichten  $B_p$  und  $B_n$  gemessen werden, erfolgt die Berechnung des Wegsignals gemäß der Erfindung durch die Bildung der folgenden Differenz:

$$x = k_1 (y_{Bp} - y_{Bn}) - k_2 y_{ic} \quad (e)$$

wobei die Meßsignale  $y_{Bp}$ ,  $y_{Bn}$  und  $y_{ic}$  sind, die Konstante  $k_1$  die Empfindlichkeit der Flußdichtemessung und die Konstante  $k_2$  die Geometrie der Magnete und die Größe des Vormagnetisierungsstromes  $i_0$  der Magnete berücksichtigt. Die Größe  $y_{ic}$  kann dabei direkt verwendet oder aus den gemessenen Größen  $y_{in}$  und  $y_{ip}$  berechnet werden. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Berechnung des Wegsignals beispielsweise mit Hilfe eines einfachen Operationsverstärkers analog erfolgt oder ob dazu ein Digitalrechner eingesetzt wird.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Betrieb eines Magnetlagers oder einer elektromagnetischen Einrichtung zum berührungsfreien Tragen von Objekten, beispielsweise eines Rotors, mit einem oder mehreren Elektromagneten (Fig. 1 und 2), oder mit Elektromagneten in Verbindung mit Permanentmagneten, mit einem Regler (5) und einem oder mehreren Leistungsverstärkern (3 bzw. 3') für die Ströme der Elektromagnete (1 bzw. 1'), so daß eine stabile, berührungsfreie schwebende Lage des zu lagernden Objektes (4) erreicht wird, dadurch gekennzeichnet, daß ein Regler verwendet wird, der derart ausgelegt ist, daß er, um die Verwendung von Wegsignalen oder von Weg- und Geschwindigkeitssignalen als Eingangsgrößen und deren Sensoren zu vermeiden, mit den im System vorhandenen, einfach zu messenden Größen Strom ( $y_i$  bzw.  $y_{ip}$  und/oder  $y_{in}$ ), als Eingangsgröße des Reglers, und Spannung ( $u$  bzw.  $u_p$  und  $u_n$ ), als Eingangsgröße der Regelstrecke, auskommt.

2. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich zu den Größen Strom und Spannung, die Induktion  $B$  gemessen wird und dem Regler (5) als weitere Eingangsgröße  $y_B$  (bzw.  $y_{Bp}$  und/oder  $y_{Bn}$ ) der Regelstrecke zur Verfügung steht, um eine Vereinfachung des Reglers und eine Verbesserung des Regelverhaltens zu erreichen (Fig. 3 und 4).

3. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß aus den Größen Steuerstrom  $y_{ic}$ , und der gemessenen Induktion  $y_B$  (bzw.  $y_{Bp}$  und  $y_{Bn}$ ) gemäß der einfachen algebraischen Gleichung  $x = k_1 y_B - k_2 y_{ic}$  bzw.  $x = k_1 (y_{Bp} - y_{Bn}) - k_2 y_{ic}$  in einem Signalvorbehandlungselement (7) ein Wegsignal  $x$  abgeleitet wird, worin  $k_1$  und  $k_2$  Konstanten

sind (Fig. 5 und 6).

4. Magnetlager zur Durchführung des Verfahrens nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein Objekt (4) durch einen oder mehrere Elektromagnete oder durch Elektromagnete in Kombination mit Permanentmagneten berührungsfrei getragen wird, indem die in der Größe des Stromes  $i$  (bzw.  $i_n$  und/oder  $i_p$ ) durch die Magnetlagerwicklungen steckende Information in einem Regler (5) verwertet wird, und über einen Verstärker (3) der Regelkreis geschlossen wird, um die Verwendung einer Sensoreinrichtung zu vermeiden.

5. Magnetlager zur Durchführung des Verfahrens nach Patentanspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß bei dem in Patentanspruch 4 beschriebenen Lager zusätzlich die Induktion  $B$  mit dem Element 6 (bzw. 6 und/oder 6') gemessen wird und dem Regler 5 als weitere Eingangsgröße zugeführt wird.

6. Magnetlager zur Durchführung des Verfahrens nach Patentanspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß bei dem in Patentanspruch 4 beschriebenen Lager zusätzlich die Induktion  $B$  mit dem Element 6 (bzw. 6 und 6') gemessen wird und in einem Signalvorbehandlungselement (7) zusammen mit dem Steuerstrom-Signal  $y_{ic}$  gemäß der in Patentanspruch 3 genannten Formel zu einem Wegsignal verarbeitet wird und so dem Regler 5 als Eingangsgröße zugeführt wird.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

30

35

40

45

50

55

60

65

— Leerseite —

Fig. 1

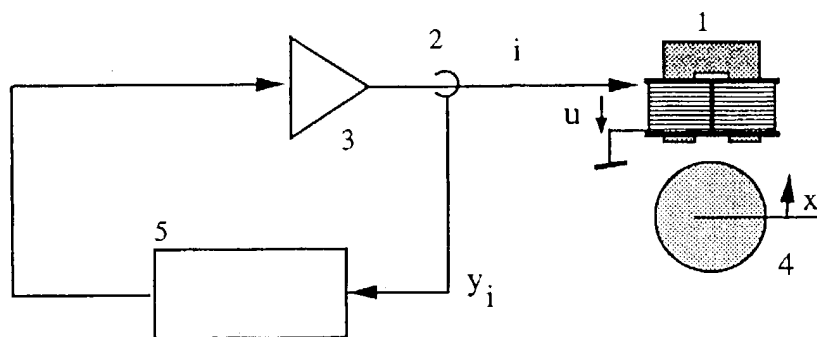


Fig. 2

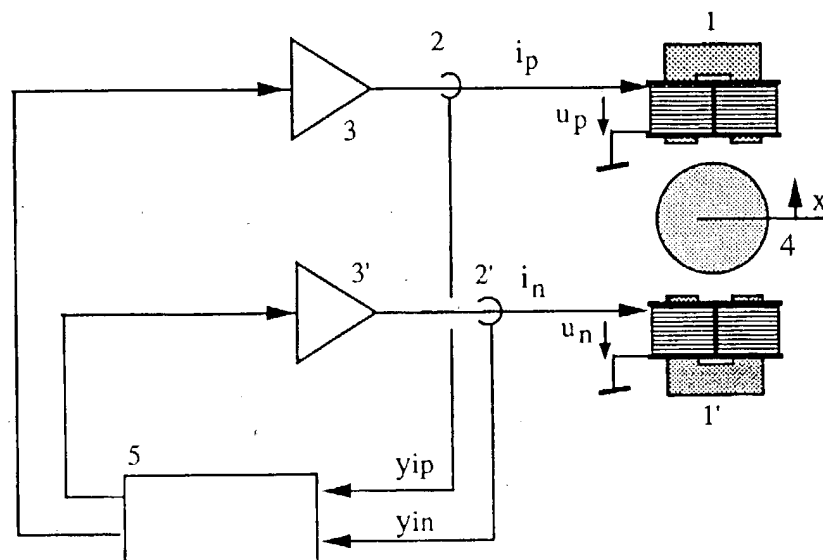




Fig. 3

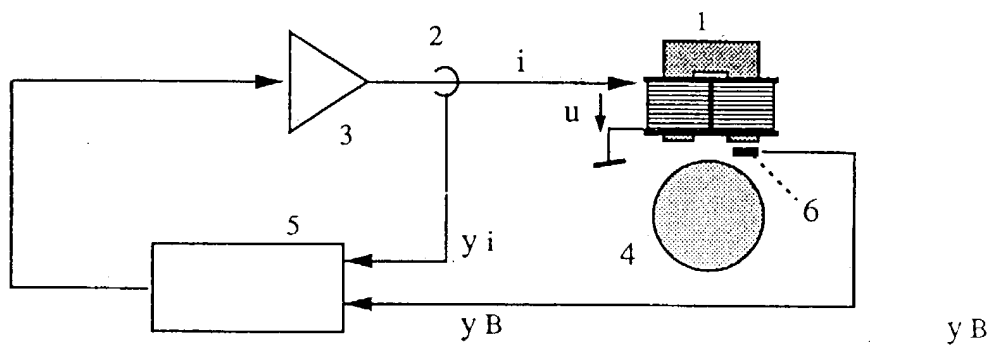


Fig. 4

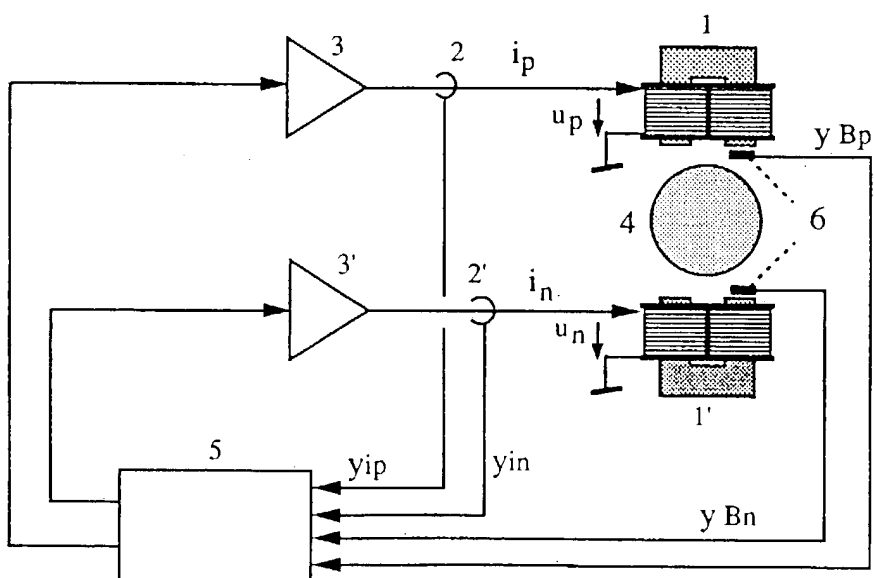


Fig. 5

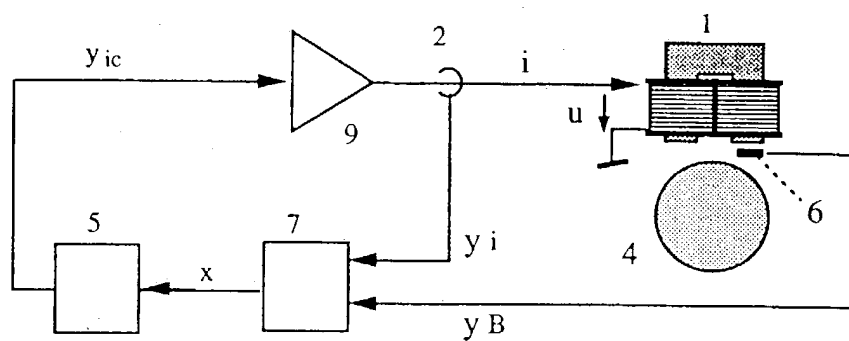


Fig. 6

